

原油装卸系统中管道设计与防腐技术应用研究

李德柱¹ 桑宝林¹ 王明英² 薛 凯³ 薛允鹏¹

(1. 青岛实华原油码头有限公司, 山东 青岛 266500)

(2. 青岛港供电有限公司, 山东 青岛 266500)

(3. 青岛港鑫油品有限公司, 山东 青岛 266500)

摘要:为应对原油装卸系统管道在复杂工况下的设计与防腐难题,研究重点开展了管道受力分析与结构设计,并系统评估了涂层防腐与电化学防护等技术的应用效果。通过构建装卸工况模拟实验平台,对管道设计方案及防腐措施进行全面验证。结果表明,采用低合金钢的管道结构应力分布合理,结合环氧煤沥青涂层与阴极保护的复合防腐方案,并对特殊部位进行镀锌处理,可将腐蚀速率控制在0.02mm/a以下,满足25年使用寿命要求,为原油装卸管道的安全运行提供了可靠的技术支持。

关键词:原油装卸系统;管道结构设计;防腐技术;复合防护;工程应用

中图分类号: TE832 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167(2025)024-0118-03

Research on Pipeline Design and Anticorrosion Technology Application in Crude Oil Handling Systems

Li Dezhu¹, Sang Baolin¹, Wang Mingying², Xue Kai³, Xue Yunpeng¹

(1. Qingdao Shihua Crude Oil Terminal Co., Ltd., Qingdao Shandong 266500, China)

(2. Qingdao Port Power Supply Co., Ltd., Qingdao Shandong 266500, China)

(3. Qingdao Port Xinyou Oil Products Co., Ltd., Qingdao Shandong 266500, China)

Abstract: To address the challenges of pipeline design and anticorrosion in crude oil handling systems under complex operating conditions, this study focuses on pipeline stress analysis and structural design, and systematically evaluates the application effects of coating-based anticorrosion and electrochemical protection technologies. A simulation experimental platform for handling conditions was constructed to comprehensively verify the pipeline design scheme and anticorrosion measures. The results indicate that a pipeline structure employing low-alloy steel exhibits a reasonable stress distribution. When combined with a composite anticorrosion scheme of coal tar epoxy coating and cathodic protection, along with galvanizing treatment for special sections, the corrosion rate can be controlled below 0.02 mm/a, meeting the service life requirement of 25 years. This provides reliable technical support for the safe operation of crude oil handling pipelines.

Keywords: crude oil handling system; pipeline structural design; anticorrosion technology; composite protection; engineering application

原油装卸系统的管道属于石油化工企业的关键设备,在运行进程中会面临高压、温度波动等多重挑战,随着装卸作业要求不断地提高,传统单一防腐措施难以满足管道长期安全运行需求,目前国内外对管道设计和防腐技术的研究比较多,不过缺乏针对装卸系统特殊工况的系统性研究,尤其是在管道结构设计与防腐技术协同应用方面研究较薄弱,急需建立适应装卸工况的设计方法和技术体系,为此本研究从装卸工况特点着手,开展管道受力分析和进行结构设计,系统研究防腐技术应用所产生的效果,通过实验验证提出完整的技术解决方案。

1 原油装卸管道系统设计研究

1.1 装卸工况下管道受力分析

原油装卸系统的管道在作业期间承受着复杂力学

载荷,静态工况时管道系统主要承受介质压力、自身重量以及管内原油重力,管道壁面会产生径向应力和轴向应力,动态工况下因装卸时流体压力波动、温度变化以及设备振动等因素^[1],管道还需承受交变载荷和热应力。通过有限元分析可知,在8MPa工作压力条件下,管道最大环向应力达到185MPa且主要集中在弯头和三通等异形管件之处,温度波动所引起的热应力峰值出现在管道约束点位置,应力值能够达到95MPa,装卸臂运动引发的振动载荷使管道产生疲劳效应,应力幅值在35~58MPa之间不断波动,综合载荷作用之下,管道关键部位应力集中系数达到2.3,局部应力超过材料屈服强度的75%存在潜在安全隐患。

1.2 管道材料与结构参数设计

根据装卸工况时管道受力方面的特点，选用抗拉强度不低于 520MPa 且屈服强度不低于 360MPa 的低合金钢当作管道材料，这种材料具备良好的韧性和可焊性，在 -40℃ 时低温冲击功不低于 35J，把管道公称直径确定为 DN200，通过强度校核以及疲劳分析将壁厚确定为 8mm，该设计满足承压设备设计规范的要求，为了降低应力集中情况，管道弯头采用热煨制工艺来制作，弯曲半径不小于管径的 1.5 倍，同时将壁厚增加到 10mm 以补偿变形减薄。管道连接采用全焊接结构来完成，把焊缝余高控制在 1.5mm 以内，并且通过超声波探伤来确保达到一级焊缝质量^[2]。在管道约束设计工作上，采用弹性支吊架体系开展设计，纵向导向支架间距按照挠度控制确定为 6m，还在温度位移较大的地方设置滑动支座，在关键异形管件的部位设置加强圈结构，这样能够有效降低局部应力集中（图 1）。

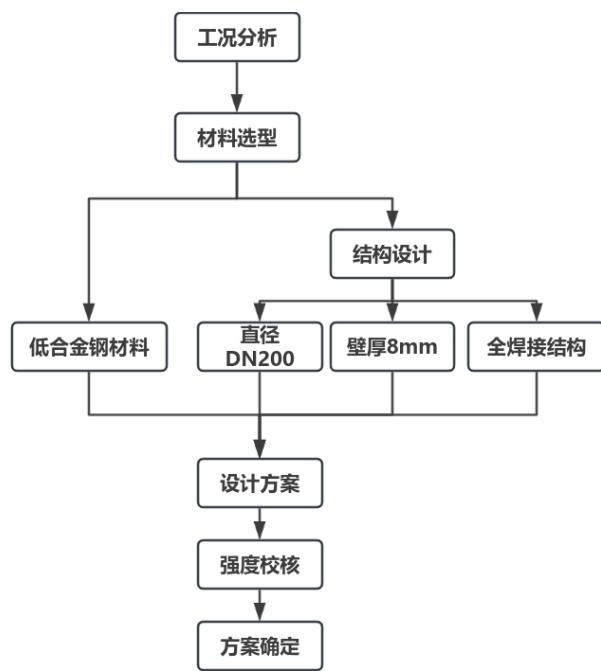


图 1 原油装卸系统管道结构设计流程

2 装卸系统管道防腐技术研究

2.1 涂层防腐技术应用

原油装卸系统管道涂层防腐运用内外壁协同防护的设计方式，外壁采用环氧煤沥青和富锌底漆复合涂层体系，底层富锌底漆里锌粉含量达到 85% 能与钢材形成有效阴极保护，面层环氧煤沥青涂料添加耐候助剂可使涂层在 -40℃ 至 80℃ 温度范围保持良好柔韧性和附着力，内壁选用高性能环氧树脂涂料并采用静电喷涂工艺实现均匀施工，涂层厚度控制在 $300 \pm 20 \mu\text{m}$ ^[3]。涂层防腐效果与涂层厚度 d 、温度 T 和服役时间 t 存在定量关系：

$$R = R_0 \cdot \left(\frac{d}{d_0} \right)^n \cdot \exp[-\beta(T - T_0)] \cdot \exp(-\lambda t) \quad (1)$$

式 (1) 中： R 为涂层防腐效果； R_0 为标准状态下的防腐效果； d_0 为标准涂层厚度，取 $300 \mu\text{m}$ ； n 为厚度指数，取 1.5； β 为温度影响系数，取 0.02； λ 为时效衰减系数，取 0.05； T_0 为标准温度，取 25℃。实验数据表明该涂层体系在设计工况下耐腐蚀性能衰减率低于 5%/ 年。

2.2 电化学防护技术应用

装卸系统管道电化学防护采用牺牲阳极法与外加电流阴极保护结合方案^[4]，两种防护方法原理如图 2 所示且通过不同方式为管道提供保护电流，埋地管段采用高效镁合金牺牲阳极其阳极材料电位为 -1.75V（相对于 Cu/CuSO4 参比电极）电流效率达 55%，阳极按 20m 间距梯形布置且单个阳极质量为 8kg 并通过解析阳极消耗速率与保护电流密度关系优化阳极使用寿命，地上管段配置智能型外加电流阴极保护系统输出电压可调范围为 0 – 50V 保护电位自动控制在 -0.85V 至 -1.2V 之间确保管道在不同土壤电阻率条件下均获有效保护，现场监测数据显示保护区段管道自然电位从 -0.55V 提升至 -0.95V 且 100 天运行期间管道表面无明显腐蚀趋势电化学阻抗测试结果表明保护效率达到 98% 以上。

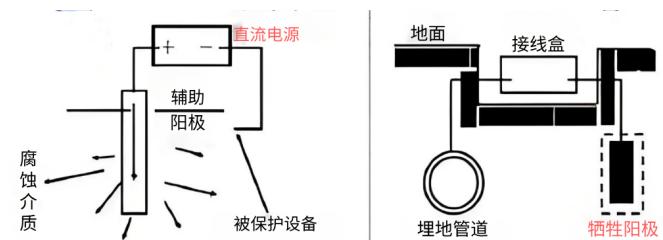


图 2 管道电化学防护原理示意图

2.3 金属涂层防护技术应用

原油装卸系统管道金属涂层选用热镀锌和铝 - 镁合金喷涂结合的防护方案，热镀锌工艺会在管道表面形成致密锌层，其厚度控制在 $85 \pm 15 \mu\text{m}$ 的范围，锌层与钢材基体之间形成 Fe - Zn 金属间化合物，结合力能达到 15MPa 以上，在空气中锌层表面会生成氧化锌保护膜从而显著提升耐蚀性能，铝 - 镁合金喷涂层运用电弧喷涂工艺，合金成分是 Al - 5% Mg 且涂层厚度为 $200 \pm 30 \mu\text{m}$ 。金属涂层的防护寿命 L 与涂层厚度 h 、环境腐蚀速率 v 之间存在定量关系：

$$L = K \cdot h \cdot (\rho / v) \cdot [1 - (h_0 / h)^2] \quad (2)$$

式 (2) 中： K 为涂层结构系数，取值 0.85； ρ

为涂层密度, g/cm^3 ; v 为环境腐蚀速率, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; h_0 为临界保护厚度, 取值 $25 \mu\text{m}$ 。实验验证表明在海洋大气环境中, 该金属涂层体系年均腐蚀速率低于 $2.5 \mu\text{m}$, 防护寿命可达 20 年以上满足原油装卸系统长期运行要求。

2.4 特殊部位防腐措施

原油装卸系统管道特殊部位的防腐设计着重对法兰、阀门、补偿器等异形构件做重点防护。法兰密封面采用聚四氟乙烯(PTFE)涂层且厚度控制在 $50 \pm 5 \mu\text{m}$, 其具备优异的化学稳定性和耐介质渗透性, 法兰外表面采用三层结构防腐依次是环氧富锌底漆、环氧云铁中间漆和聚氨酯面漆且总厚度达到 $320 \mu\text{m}$, 阀门本体采用玻璃钢衬里工艺且衬里材料选用酚醛树脂基体增强料厚度为 4mm 硬度达到邵氏 85 度有良好耐磨损性, 补偿器采用橡胶衬里结构且选用丁腈橡胶作为衬里材料硫化工艺温度控制在 155°C 硫化时间 90min 确保衬里与金属基体结合力不低于 4MPa , 现场应用数据表明特殊部位采用上述防腐措施后在 5 年运行期内未出现防腐层损坏和腐蚀穿孔现象有效解决了异形构件的局部腐蚀问题。

3 设计与防腐方案实验验证

3.1 实验方案与装置设计

针对原油装卸系统管道在复杂工况下的运行特点, 搭建了集成温度循环、压力波动和介质腐蚀的模拟实验装置, 该装置由高温高压循环系统电化学防护单元和数据采集模块构成。

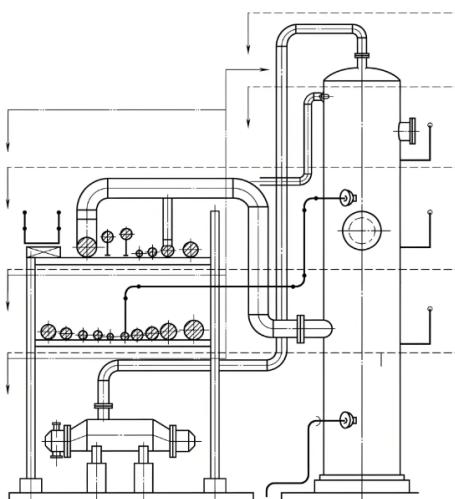


图 3 原油装卸系统管道防腐性能测试装置示意图

实验装置示意图如图 3 所示, 实验系统温度控制范围是在 -40°C 到 80°C 之间, 借助程序控制器达成快速升温循环来模拟装卸过程温度冲击效应, 压力控制系统采用比例调节阀, 在 $0 - 12\text{MPa}$ 范围产生随机波动压力以重现装卸臂运动引起压力脉动。试验介质选用含 2.5% 氯化钠和 0.5% 醋酸的模拟溶液, 将 pH

值调节到 4.5, 通过控制溶解氧含量和电导率来模拟原油中的腐蚀性组分。实验装置配备高精度电化学工作站, 用来原位监测管道试样的极化行为和阻抗响应, 同时布置超声波测厚、红外成像等多种在线检测手段, 以此实现对防腐层完整性和基体腐蚀行为实时跟踪。

3.2 防腐效果检测与评价

采用多维度评价体系来对管道防腐方案开展系统检测工作, 通过建立腐蚀程度与防护性能之间的关联关系去评估防腐技术实际应用效果, 在 150 天加速腐蚀试验当中对比分析不同防腐方案的防护性能, 检测结果如表 1 所示:

表 1 不同防腐方案的防护性能对比评价结果

防腐方案	腐蚀速率 (mm/a)	防护效 率 (%)	阻抗值 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	破损面 积率 (%)	附着力 (MPa)
环氧煤沥青涂层	0.024	95.8	2.3×10^8	0.15	12.5
热镀锌 + 合金喷涂	0.031	94.2	1.8×10^7	0.28	15.8
电化学防护	0.018	96.5	-	-	-
复合防腐方案	0.012	97.8	3.1×10^8	0.08	13.2

环氧煤沥青涂层跟电化学防护结合起来的复合防腐方案展现出最出色的防护性能, 其中涂层体系在温度循环条件当中能够保持良好的结构稳定性, 电化学防护系统的协同作用明显提升了整体的防腐效果。

4 结语

对原油装卸系统管道设计和防腐技术开展系统研究后, 建立起基于工况分析的管道结构设计方法, 形成涵盖涂层防腐、电化学防护和金属涂层的多层次防腐技术体系, 实验研究表明优化设计的管道结构可满足装卸工况要求, 采用的复合防腐方案具备良好防护效果, 研究成果在某大型油品储运企业获得成功应用, 运行数据显示管道结构安全可靠且防腐效果显著, 年腐蚀率符合设计指标, 研究建立的管道设计方法和防腐技术应用体系能为同类工程提供重要参考, 对提升原油装卸系统本质安全水平有重要意义。

参考文献:

- [1] 张晓辉. 油气管道防腐施工技术及效果分析 [J]. 工程技术研究, 2025, 10(06):84-86.
- [2] 王清春, 王洁光. 石油化工管道防腐关键技术研究 [J]. 化工管理, 2025(02):129-132.
- [3] 陈泷. 浅谈原油储备库管道材料设计 [J]. 山东化工, 2024, 53(03):210-212.
- [4] 肖娜, 邵赛, 刘轩. 埋地原油集输管道防腐技术适用性分析 [J]. 全面腐蚀控制, 2023, 37(08):132-135.

作者简介:

李德柱 (1989-) 男, 汉族, 山东新泰人, 本科, 工程师, 研究方向: 化学工程。